

報告番号 ~~第~~ 434 号

# 主論文の要旨

題名 非線形最適化法による  
トカマクプラズマ解析に  
関する研究

氏名 東井和天

報告番号

※ 第 1484 号

氏名

東井和夫

核融合研究は種々の角度から世界各国で精力的に進められている。特に、トカマクプラズマは核融合炉心プラズマのパラメータに最も近い位置を占めている。現在、これまでに得られた実験結果に基づいて装置の大型化が計画されている。このような情勢から、多種多様な大量の実験データをできるだけ短時間にしかも精度よく処理するとともに、データに含まれる情報を最大限に引き出し装置設計に十分反映していくことが以前にもまして必要となってきた。

本論文はトカマクプラズマに関連した測定データの処理、非線形境界値問題の解析および磁場設計への非線形最適化法の応用に関するものである。

ここでトカマク装置の原理の概要とそれによって得られるプラズマについて簡単に述べよう。トカマク装置は、トーラス方向に強磁界を発生するトロイダル磁場コイル、プラズマのトーラス方向に大電流を誘起するための変

報告番号	乙 ※ 第	号	氏名	東井和夫
<p>流器一次コイル，およびプラズマを平衡状態に保持するための垂直磁場コイルから形成されている。プラズマが変流器の二次回路を形成している。プラズマの主なパラメータであるプラズマ中心での電子温度，イオン温度および電子密度はそれぞれ，約 2 keV，約 1.8 keV および約 <math>9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}</math> という値にまで達している。また，エネルギー閉じ込め時間は約 80 msec となっている。現在，トカマクプラズマに関して，不純物の輸送現象，プラズマ電流の遮断をひき起こすディスラプティブ不安定性，プラズマの追加熱，プラズマ位置のフィードバック制御等が重要な研究課題となっている。</p>				
<p>以下に本論文の概要について述べる。本論文は 6 章から構成されている。</p>				
<p>第 1 章において，トカマクプラズマ研究の現状と炉心プラズマに至る過程での重要な問題点について述べた。次に本研究の意義と目的について述べ，最後に本論文の全容を明確</p>				

報告番号

乙  
※限第

号

氏名

東井和夫

にするため、本章に続く各章について簡単に紹介した。

第2章では、第3章以下の議論を円滑に進めるため非線形最適化法の応用面でのいくつかの重要な問題点について要約した。すなわち、最適化の尺度としての目的関数の概念、制約条件を有する場合の一般的な処理方法としてのSUMT法および線形最適化問題と非線形最適化問題の区別について述べた。また、非線形最適化問題における最大の問題点、すなわち最適化問題の多峰性について述べた。筆者はこの問題については、物理的考察で考えられる可能な範囲で初期推定値をいくつか変えて同一の解に収束することを確認することにより回避できた。次に、測定データの処理において設定した物理的モデルを特徴づける未知パラメータの数を変えることにより、その各々の場合について最適解が得られる。これらの最適解のうちどれを真の解として採用するかを判定規準として、情報量規準：

報告番号	※ <sup>乙</sup> 第	号	氏名	東井和夫
<p>AIC を導入することを提案した。最後に、最適化計算に使用した二種類の数値計算アルゴリズムについて述べた。一つは目的関数の微分を使用する、いわゆる傾斜法に属するもので、最大傾斜法、変形 <i>Newton-Raphson</i> 法および <i>Newton-Raphson</i> 法を目的関数のヘシアン行列の正定値性に依じて使いわける計算法である。いま一つは、目的関数の微分演算が不要な直接探索法に属するシンプレックス法である。これらの方法の原理およびその利点と欠点について述べた。</p>				
<p>第3章、第4章および第5章において非線形最適化法の基本的な三種類の応用例すなわち、測定データの処理、非線形境界値問題の解析および磁場設計について詳しく述べた。</p>				
<p>まず第3章では、トカマクプラズマの測定データを非線形最適化法により処理・解析することにより良好な結果が得られることを示した。筆者がJFT-2トカマク(日本原子力研究所)において行なった交流インダクタンス測定で得</p>				

報告番号	※ <sup>乙</sup> 限第	号	氏名
			東井和夫
<p>られたデータを例にとりて詳しく述べた。この測定法によりトカマクプラズマの高温領域の規模を特徴づける有効プラズマ半径およびプラズマ導電率分布というトカマクプラズマの基本的な情報を得られる。さらに電流密度分布の間接的な測定や不純物の効果も含めた導電率の異常係数の空間分布の推定といった重要な意味をもも有している。まず、プラズマの交流インダクタンスの測定法について簡単に述べた。ついで、それによって得られる減衰振動波形の分析に非線形最小二乗法を適用し、非線形最適化法により計算して精度よく波形パラメータが決定できることを示した。このようにして求めたJFT-2プラズマの交流インダクタンスの周波数依存性を求めた。また、固体リミターのトカマクプラズマに対する影響を調べることを目的としダイナミックリミターを使用した実験におけるプラズマ有効半径の時間的な振舞を得、それがリミターの動きとともに拡がることを明らかに</p>			

報告番号

※<sup>乙</sup>第

号

氏名

東井和夫

にした。次に、いままで正確なデータ解析が殆んど不可能であった上記の交流インダクタンスの周波数依存性から、非線形最適化法によりプラズマ導電率分布を精度よく決定できることを示した。四種類の導電率分布の場合に対する交流インダクタンスを模擬データとして用い導電率分布の推定を行ない、この解析法の有効性を明らかとした。この場合、測定データに対し設定した導電率分布のモデルの良さの評価規準として情報量規準：AICを導入し、AIC最小化という判定法により最適解を選び出すことができた。この手法により、JFT-2プラズマの導電率分布を能率よく決定できた。また、交流電磁場に対しプラズマは複素導電率を有する媒質として振舞うので、上記解析と並行して導電率の虚数部の交流インダクタンスに与える影響についても詳細に議論した。トカマクプラズマの測定データの大部分は上記データと同様、適当な積分変換を施さなければ、局所的な情報が得ら

報告番号	* 巻第 号	氏名	東井和夫
<p>れ存い。このようなデータ処理に関連した、いわゆる逆向題の解法として、非線形最適化法は強力な手段となりうることを本章の最後にいくつかの例をあげて指摘した。</p>			
<p>第4章では、トカマクプラズマのイオン温度の定常状態解析を例にあげて、非線形境界値問題の非線形最適化法による処理方法について述べた。まず、第2章で述べたダイナミックリミターを使用した実験におけるイオン温度の変化について Artsimovich の比例法則に基づいて有効プラズマ半径の時間変化と関係づけて解釈を試み、イオン温度が時間的に変化する場合に対しても新古典輸送理論の範囲内でよく説明できることを示した。このデータの解釈に際し、イオン温度の定常分布を求める必要があり、この非線形境界値問題を有限要素法をさらに一般化した重みつき残差法により変分問題に変換し、非線形最適化法により能率よく解が得られた。この結果 Artsimovich の比例法則の比例係数は、電流密度分布には殆ん</p>			



報告番号	乙 ※ 順第	号	氏名
			東井和夫
<p>どよらず、電子密度分布でほぼきまることが明らかとなり、上記実験データの解釈に有効な情報をもたらした。最後に、トカマクプラズマのMHD平衡といったさらに複雑な非線形境界値問題の解法にも上記の手法が非常に有効であることを示唆した。</p> <p>非線形最適化法の応用におけるもう一つの重要な対象は最適設計である。その重要な応用例として第5章では、トカマク装置における制御磁場コイルおよび変流器一次コイルの最適設計を行ない、非線形最適化法が非常に有効であることを示した。トカマクプラズマにおいては制御磁場コイル、変流器一次コイル等の外部磁場コイルの発生する磁場の強さだけでなくその空間分布はMHD平衡、安定性および輸送現象に大きな影響を持っている。従って、制御磁場コイルの発生する磁場がプラズマの平衡に必要な磁場強度および分布に最もよく適合するように、また変流器一次コイルに対してはそれがプラズマ領域に発生</p>			

報告番号

※<sup>乙</sup>第

号

氏名

東井和夫

する磁場強度が最も小さくなるようにするという条件で最適設計を行なった。従来の設計法では、コイル位置を予め指定し各コイル電流値を決定するというものであったが、各コイルの電流値のはなはだしい不均衡が生じることが多い。この欠点は、コイル位置を未知パラメータとして最適化を行なうことで克服できることを例を示して明らかにした。SUMT法の応用も行ない良好な結果が得られた。この非線形最適化法による手法は上記の磁場コイルの設計のみならずトーラス装置設計における種々の部材の最適設計に対しても強力な手段となりうることを述べた。

本論文の最後に本研究で明らかとした事項についてまとめた。今後の非線形最適化法の応用の可能性と問題点について要約した。